

Caractérisation de l'épaisseur et du module d'élasticité du béton des dalles par des techniques acoustiques

N. RENAULT^a, P. PLIYA^a, J-L. GALLIAS^a

a. Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (L2MGC), 5 mail Gay Lussac, Neuville sur Oise, 95031 CERGY-PONTOISE Cedex

Résumé :

La connaissance des caractéristiques géométriques et mécaniques des ouvrages en béton armé est indispensable pour une évaluation préalable à toute opération de maintenance ou de réhabilitation. Or, souvent, les maîtres d'ouvrage ne disposent pas les informations nécessaires, surtout lorsque les ouvrages sont relativement anciens. Disposer des outils de caractérisation fiables, faciles à mettre en œuvre et, dans la mesure du possible, non destructifs répond donc à un vrai besoin compte tenu du nombre d'infrastructures en béton armé vieillissantes.

Pour répondre à ce besoin nous avons développé au Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil de l'Université de Cergy-Pontoise une méthodologie originale qui combine deux techniques acoustiques complémentaires, la technique d'Impact-Écho et la technique Micro-Sismique, permettant d'évaluer, d'une part, l'épaisseur de l'élément en béton ausculté et, d'autre part, la qualité du béton sur la base de son module d'élasticité dynamique et de l'identification d'éventuelles fissures ou d'autres défauts compromettant l'intégrité mécanique de l'élément ausculté. La technique d'Impact-Écho exploite la propagation des ondes de compression à travers le béton suite à un impact mécanique en surface alors que la technique Micro-Sismique exploite la propagation des ondes de Lamb en surface de l'élément ausculté. L'application in situ de cette méthodologie fut effectuée en collaboration libre avec les Aéroports de Paris, à l'aéroport du Bourget sur des dalles de l'aire de stationnement d'avions dont les conditions de fabrication étaient inconnues. Ces travaux ont donné des résultats probants et convaincants et ont permis de répondre pleinement aux besoins de connaître les caractéristiques de ces structures.

Abstract :

The knowledge of the geometrical and mechanical characteristics of the reinforced concrete is essential for preliminary evaluation relative to any operation of maintenance or rehabilitation. Yet, the owners have not access to necessary information, especially when the structures are relatively old. To develop reliable tools of characterization, easy to use and, whenever possible, non-destructive meets real needs considering the number of reinforced concrete infrastructures ageing.

To answer this need we developed in the Laboratory of Mechanics and Materials of the Civil Engineering of the University of Cergy-Pontoise an original methodology which use two complementary acoustic techniques, the technique of Impact-Echo and the Micro-Seismic technique, allowing to estimate, on one hand, the thickness of the concrete structure and, on the other hand, the quality of this concrete on the basis of its dynamic modulus of elasticity and the identification of possible cracks or the other defects compromising the mechanical integrity of structure. The technique of Impact-Echo exploits the propagation of compression waves through the thickness of concrete consequently at a mechanical impact, whereas the Micro-Seismic technique exploits the propagation of the Lamb waves on the free surface of the structure. The application in situ of this methodology was made in collaboration with the Airports of Paris, at the airport of Bourget on concrete slabs of the parking of planes which the manufacturing conditions were unknown. These works gave convincing results and allowed to meet the needs completely to know the characteristics of these structures.

Mots clefs : Contrôle non destructif, Structure béton, Techniques acoustiques, Ondes de Lamb

1 Objectif de l'étude

L'étude a pour but d'évaluer la qualité du béton, de déterminer la présence et l'étendue de discontinuités (fissures importantes, délaminations,...) et d'estimer l'épaisseur de dalle par méthode non destructive. Pour cela nous utiliserons deux techniques : l'une connue est déjà mise sur le marché du Diagnostic des structures en béton et du Contrôle Non Destructif, la Technique Impact-Écho [1,2], l'autre est appelée technique Micro-Sismique et est basée sur la propagation d'ondes de surface (ondes de Lamb) [3]. L'analyse des signaux acquis par ces deux techniques permettront de trouver les caractéristiques recherchées des structures en béton étudiées.

2 Présentation des techniques acoustiques utilisées

La technique Impact-Écho consiste à mettre en vibration la structure sur l'épaisseur totale de la dalle en béton (ou jusqu'à une éventuelle discontinuité) par un impact mécanique (par une bille d'acier de 3 mm de diamètre). Le matériel utilisé est décrit en [6]. Cette onde se propage et se réfléchit sur la surface libre la plus proche de l'impact (figure 1). Une transformée de Fourier temporelle du signal réfléchi permet de déterminer la fréquence de résonance de la dalle. Cette mesure est une information locale et permet de repérer des hétérogénéités d'épaisseur ou des possibles discontinuités (fissures, vides, délaminations,...) dans le sens parallèle à la surface de la dalle.

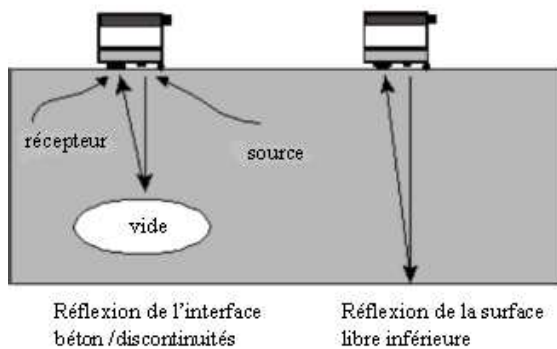


FIG. 1 – Principe de la technique Impact-Écho

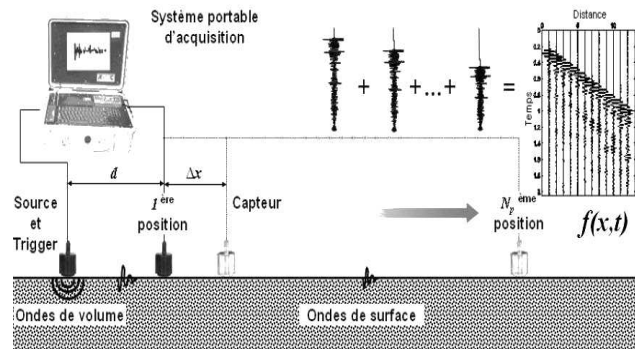


FIG. 2 – Principe de la technique Micro-Sismique

La technique Micro-sismique MS consiste à acquérir des signaux à différentes distances de l'impact, le long d'une ligne d'étude (fréquence d'échantillonnage : 200 KHz, pas de mesures : de 10 à 20 cm). Cela peut être effectué de deux façons : i) Avec une source fixe en déplaçant le capteur (figure 2), ii) Avec un capteur fixe en déplaçant le lieu d'impact. L'ensemble de ces sismogrammes permet de constituer une trace sismique de la propagation des ondes de surface le long de la ligne d'étude en fonction du temps et de la distance à l'impact $f(x,t)$. Cette mesure est une information globale et permet d'évaluer l'intégrité mécanique de la dalle et le rôle des éventuelles discontinuités dans le sens perpendiculaire à la surface libre (fissures, reprises de bétonnage...). Le dispositif d'acquisition est décrit en [7], [8], [9].

2.1 Analyse des mesures Impact-Écho (IE)

Cette technique nécessite une information préalable. En effet, la connaissance de la fréquence de résonance d'une dalle homogène ne nous permet pas de déterminer le module d'élasticité dynamique et l'épaisseur de cette dalle (les deux grandeurs sont corrélées). Dans ce cas, il est nécessaire d'avoir accès à une des deux valeurs recherchées pour déterminer l'autre et supposer aussi une valeur représentative de la masse volumique du béton (2300 kg/m^3) et de son coefficient de Poisson (0,21) :

- 1er cas : l'épaisseur de la dalle de béton est connue, on détermine le module d'élasticité dynamique E .

- 2ème cas : l'épaisseur de la dalle de béton n'est pas connue, on suppose une certaine vitesse de propagation des ondes V_p dans le béton (généralement autour de $3500\text{--}4000\text{ m/s}$) et on estime le module élasticité dynamique et l'épaisseur.

$$V_p = 2fh/\beta \quad (1)$$

$$E = \rho V_p^2 \alpha \quad (2)$$

ρ	Masse volumique du béton	β	Facteur de forme [4]
f	Fréquence de résonance	α	Facteur dépendant du
h	Épaisseur du béton		coefficient de Poisson ν

2.2 Analyse des mesures Micro-sismique (MS)

L'analyse de la trace sismique $f(x,t)$ s'effectue dans le domaine spectral. Après avoir effectué deux transformées de Fourier sur les signaux (une temporelle, l'autre spatiale), les modes de résonance de la dalle sont présentés dans le diagramme « Fréquence f - Vitesse de phase V_{ph} ». Sur la figure 3, les pics de résonance expérimentaux sont représentés par des 'o'.

Ces pics de résonance sont à rapprocher d'une modélisation de la vibration d'une dalle homogène de longueur infinie d'épaisseur connue h et de module d'élasticité connu E . Cette approche théorique est basée sur la propagation des ondes mécaniques dans un milieu continu [3]. En prenant en compte l'absence de contrainte sur les surfaces libres de la dalle, elle consiste à résoudre deux équations transcendantes permettant de déterminer la vitesse de phase de résonance pour une fréquence temporelle donnée. Ces modes théoriques sont de deux types : les modes symétriques et les modes antisymétriques.

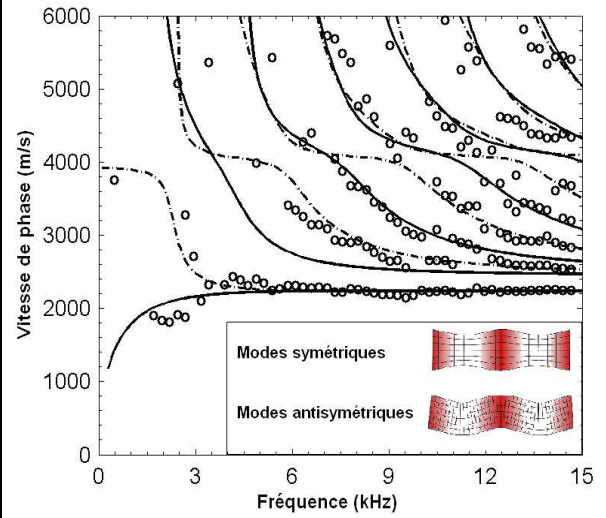


FIG. 3 – Tracé des modes de résonance expérimentaux (o) et théoriques symétriques (lignes discontinues) et antisymétriques (lignes continues)

Comme décrit en figure 4, une résolution d'un problème inverse et la minimisation d'une distance entre les modes expérimentaux et théoriques [5] permettent de déterminer l'épaisseur et le module d'élasticité dynamique de la dalle étudiée (sans hypothèse préalable, contrairement à la technique Impact-Écho, à l'exception de la masse volumique et du coefficient de Poisson).

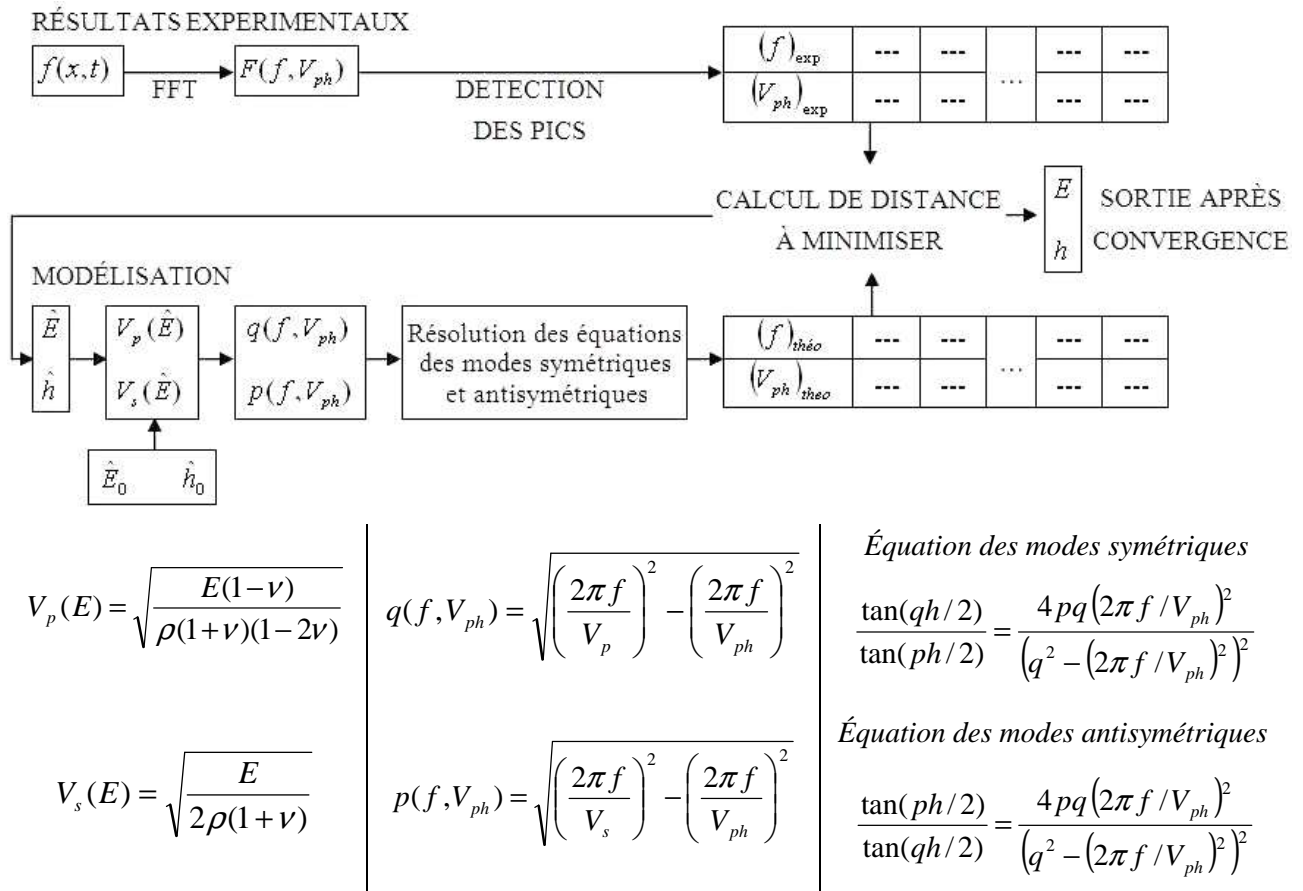


FIG. 4 – Algorithme d'analyse de la technique MS avec ces formules principales

3 Étude des dalles sans défauts apparents majeurs

L'application in situ de cette méthodologie fut effectuée en collaboration libre avec les Aéroports de Paris, à l'aéroport du Bourget sur deux dalles de l'aire de stationnement d'avions dont les conditions de fabrication étaient inconnues.

Plusieurs lignes d'études ont été auscultées. Dans cet article, on se limitera à présenter les résultats obtenus sur une ligne par dalle :

- Dalle A de 7,2m x 6,5m sans défaut apparent majeur à l'exception d'un léger faïençage en surface dû probablement à la dessiccation de béton au jeune âge.
- Dalle B de 4,5 m x 4,5 m sans aucun défaut apparent.

La figure 5 présente les résultats obtenus sur la dalle A. À noter que sur les sismogrammes, nous présentons des signaux normés ce qui efface toute atténuation dû à la distance à l'impact.

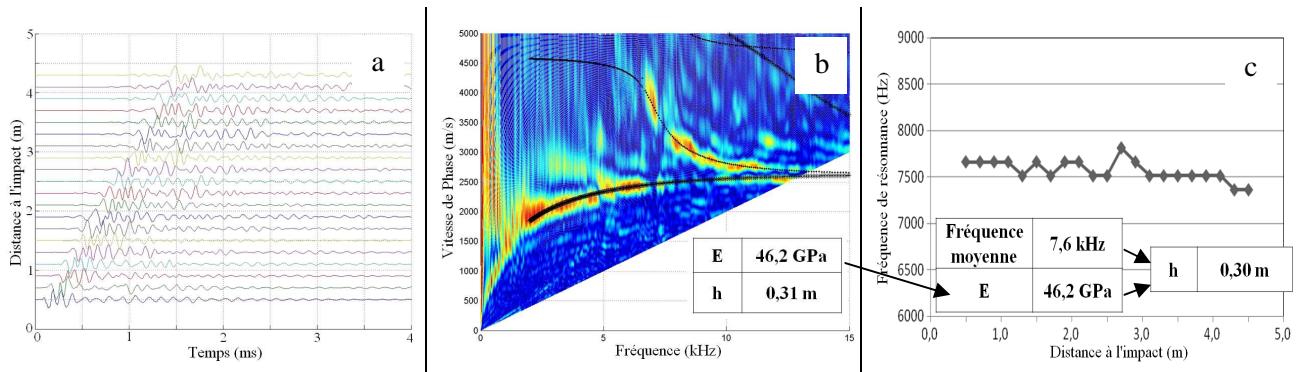


FIG. 5 – Résultats expérimentaux sur la dalle A : (a) Sismogrammes MS, (b) Diagramme « Fréquence-Vitesse de phase », (c) Fréquence de résonance IE le long de la ligne d'étude

L'analyse des résultats MS (figure 5b) permet de conclure que l'épaisseur de la dalle A est de 30 ± 1 cm et que son module d'élasticité dynamique est de 47 ± 1 GPa. Ces résultats ont été confirmés sur d'autres lignes de la même dalle. Afin de valider notre résultat, on utilise la technique Impact-Écho (figure 5c) en y injectant une des deux informations (ici le module d'élasticité) comme une donnée préalable. Le calcul de l'épaisseur effectué à partir de la fréquence de résonance moyenne de la dalle confirme le résultat de la technique MS.

Pour la dalle B, nous avons bénéficié du fait que l'équipe de maintenance de l'aéroport du Bourget procédait à des destructions/réhabilitations des dalles sur une autre partie de l'aire de stationnement dont l'épaisseur était de $25 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$. L'auscultation de la dalle B donne les résultats sont présentés sur la figure 6.

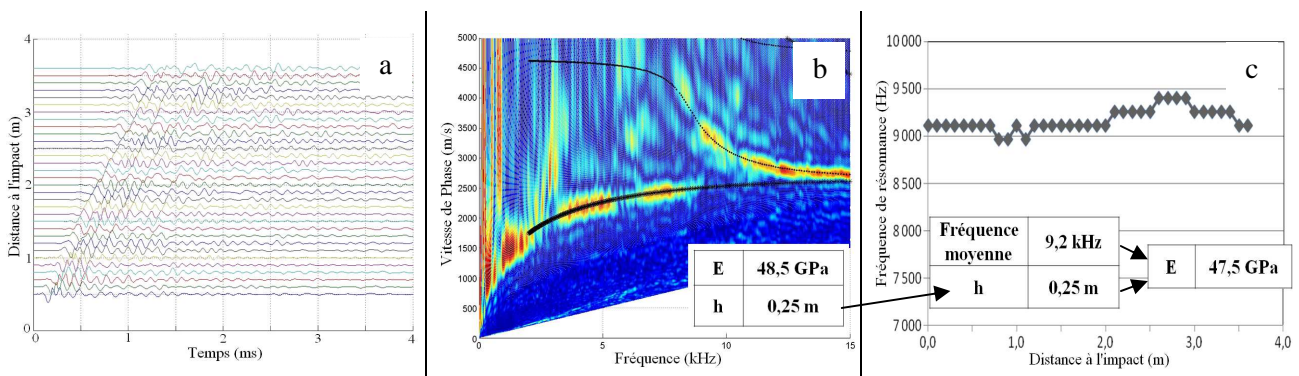


FIG. 6 – Résultats expérimentaux sur la dalle de l'Etude B : (a) Sismogramme MS, (b) Diagramme « Fréquence-Vitesse de phase », (c) Fréquence de résonance IE le long de la ligne d'étude

L'analyse des résultats MS (figure 5b) permet de conclure que l'épaisseur de la dalle B est de 25 ± 1 cm et que son module d'élasticité dynamique est de $47 \pm 1,5$ GPa. Ces résultats ont été confirmés sur d'autres lignes de la même dalle. Sur le même principe que celui utilisé pour la dalle A, nous avons injecté la valeur de l'épaisseur dans la technique IE et nous avons déduit une valeur du module d'élasticité tout à fait comparable de celle donnée par la technique MS.

4 Etude de la sensibilité de la technique MS

Afin de vérifier la sensibilité à déduire une épaisseur et un module d'élasticité à partir des mesures MS, nous avons illustré sur la figure 7a les modes théoriques concordant avec les résultats expérimentaux de la dalle A ainsi que les modes théoriques correspondant à une variation d'épaisseur de ± 5 cm pour le même module d'élasticité. De même, sur la figure 7b, nous avons illustré les modes théoriques concordant avec les résultats expérimentaux de la même dalle ainsi que les modes théoriques correspondant à une variation du module d'élasticité de ± 5 GPa pour la même épaisseur.

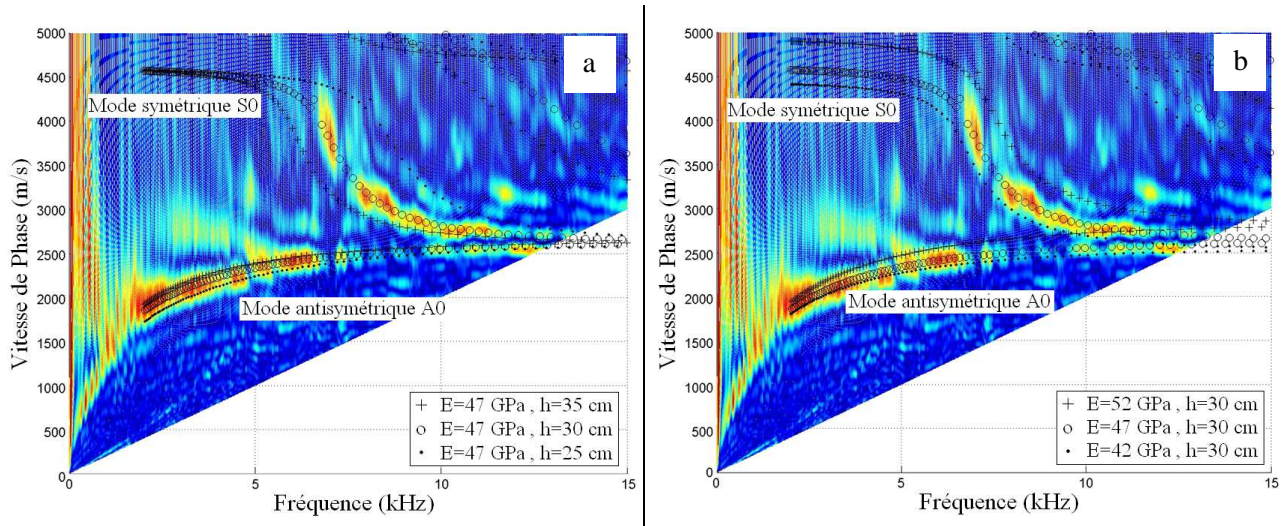


FIG. 7 – Etude de la sensibilité aux paramètres : (a) Variation de l'épaisseur, (b) Variation du module d'élasticité dynamique

Une diminution de l'épaisseur a pour conséquence sur le tracé des modes théoriques une « dilatation » dans le sens des fréquences alors qu'une augmentation du module d'élasticité génère une « dilatation » selon la première bissectrice (aussi bien dans le sens des fréquences que dans le sens des vitesses de phase). Cette différence d'évolution du tracé des modes théoriques suivant les variations des deux paramètres nous assure une non-corrélation lors de l'identification des paramètres.

D'autre part, on voit sur les figures 7a et 7b l'importance du premier mode symétrique pour déterminer de manière satisfaisante les deux paramètres de la dalle. Si expérimentalement, on ne visualise pas le premier mode symétrique alors l'incertitude sur l'évaluation de l'épaisseur dépassera l'ordre du cm et celle sur l'évaluation du module d'élasticité dépassera l'ordre du GPa.

5 Etude des discontinuités

Nous nous sommes intéressés au problème des discontinuités et nous avons effectuée deux auscultations complémentaires :

- Dalle C de 7,2m x 6,8m où une fissure importante d'ouverture de 1mm traverse la ligne d'étude et progresse sur une partie importante de la largeur de la dalle (figure 8a).
- Interface entre deux dalles contigües de dimension chacune 4,5m x 4,5m (figure 8b).

Comme précédemment, les sismogrammes sont présentés avec des signaux normés ce qui efface toute atténuation due à la présence de la discontinuité. Les signaux après la discontinuité sont en effet très fortement atténués.

On remarque en premier lieu la différence de comportements acoustiques des deux discontinuités. Les sismogrammes de la dalle fissurée (figure 8a) présente un délai de transmission des signaux d'environ 4 ms après la fissure, indépendamment de la distance des capteurs par rapport au point d'impact. Ce délai corrobore le temps nécessaire pour que l'onde de surface contourne la fissure et les ondes de surface arrivent presque perpendiculairement sur la ligne de mesure, après la fissure. On peut conclure que la fissure est traversante car les ondes n'ont pas d'autre choix que de contourner la fissure pour exciter le milieu après fissure.

Sur la figure 8b, l'étude de l'interface entre deux dalles amène à des conclusions tout autres. On remarque sur ce sismogramme une variation de la vitesse de transmission lors du passage de l'interface. Pour passer, l'onde doit parcourir un chemin plus long que la simple ligne droite en surface. On peut supposer qu'elle emprunte un chemin dans l'épaisseur, là où la reprise de bétonnage permet une liaison mécanique entre les deux dalles. On peut conclure que les dalles contigües possèdent un contact en profondeur.

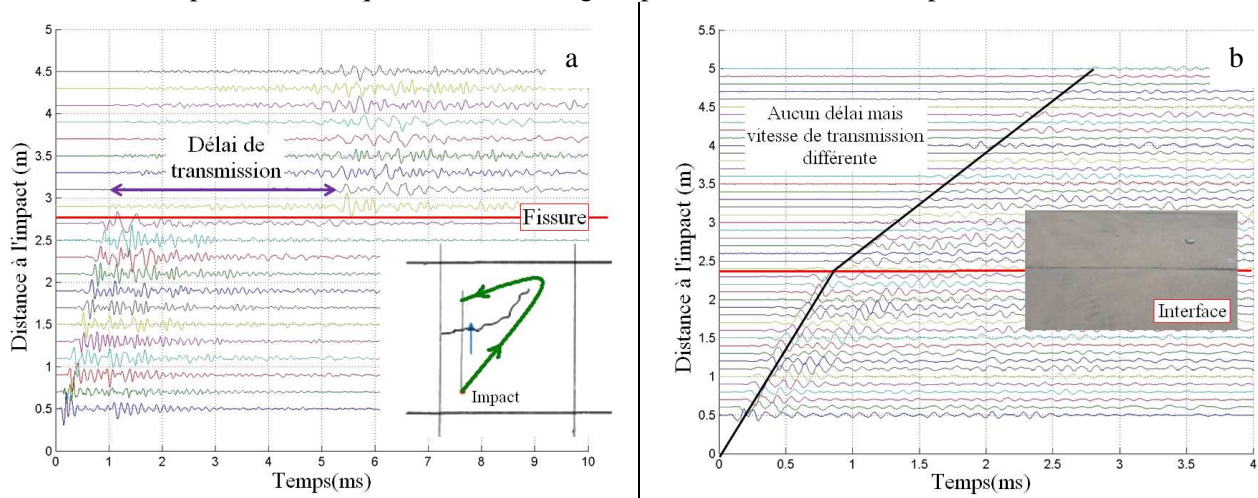


FIG. 8 – Sismogrammes de l'auscultation des discontinuités : (a) Étude de la fissure de la dalle C, (b) Étude de l'interface inter-dalle

6 Conclusions et Perspectives

A travers ces résultats, les deux techniques d'Impact-Écho et Micro-Sismique sont complémentaires et permettent d'évaluer :

- l'épaisseur au cm près et le module d'élasticité au GPa près d'une dalle.
- l'importance d'une fissuration apparente et son rôle dans le comportement mécanique de la dalle afin de discriminer une fissuration de surface d'une fissuration profonde.
- la liaison mécanique au niveau d'une reprise de bétonnage.

Les travaux se poursuivent afin de répondre à plusieurs questions :

Comment évaluer l'épaisseur d'une couche de béton endommagé sur une dalle incendiée par exemple ? Pour cela, l'algorithme devra prévoir une structure non homogène (type composite).

Comment évaluer la qualité des structures en béton non planes et de forme complexe ? Pour cela, il faut travailler sur la répartition fréquentielle de l'énergie injectée par l'impact et l'atténuation des signaux.

Références

- [1] Sansalone M.J., Carino N.J., A method for flaw detection in concrete using transient stress waves, National Bureau of Standards, Rep. No. NBSIR 86-3452, Gaithersburg, Md, 1986.
- [2] Sansalone M.J., Streeth W.B., Impact-echo non-destructive evaluation of concrete and masonry, Bullbrier Press, 1997.
- [3] Al Wardany R., Caractérisation non destructive des structures en béton au moyen des ondes dispersives de Rayleigh et de Lamb, Mémoire de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, Université de Sherbrooke, 2005.
- [4] D. Royer, D. Clorennec, C. Prada, Caractérisation de plaques et de tubes par modes de Lamb à vitesse de groupe nulle, Méthodes innovantes en CND, p. 73-94, 2010.
- [5] D. W. Marquardt, An algorithm for least-squares estimation of non linear parameters, Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, Vol. 11 (n°2), p 431-441, 1963.
- [6] http://www.olsoninstruments.com/pdf_downloads/catOI_ie.pdf
- [7] <http://www.bksv.com/Products/transducers/vibration/accelerometers/accelerometers/4518003.aspx>
- [8] <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/fr/nid/209541>
- [9] <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/fr/nid/207401>